

Астроосінь-2023, ГАО НАН України

25 жовтня 2023 р.

**Екстремально сильні магнітні поля в активних
процесах на Сонці: цінна знахідка класичної
зеєман-спектрополяриметрії і виклик
сучасним МГД теоріям**

В.Г. Лозицький

**Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка**

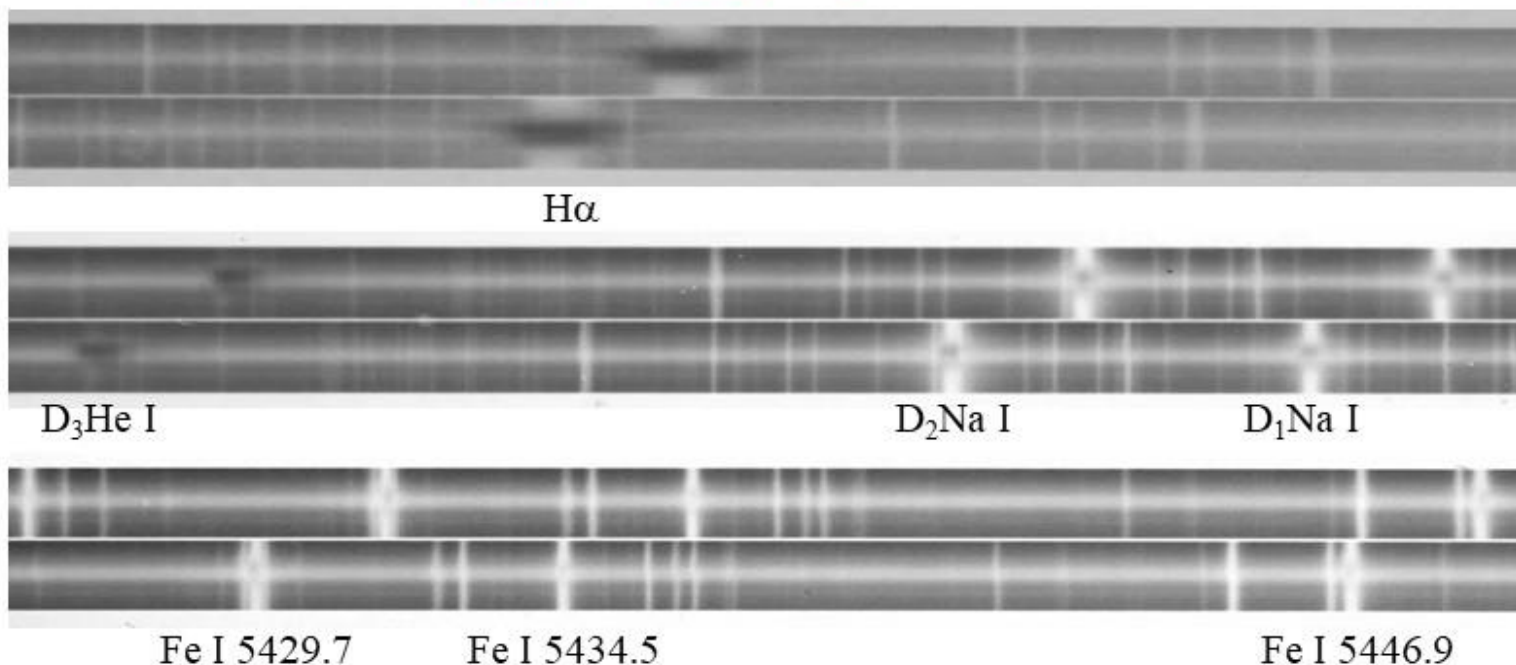
Вступ

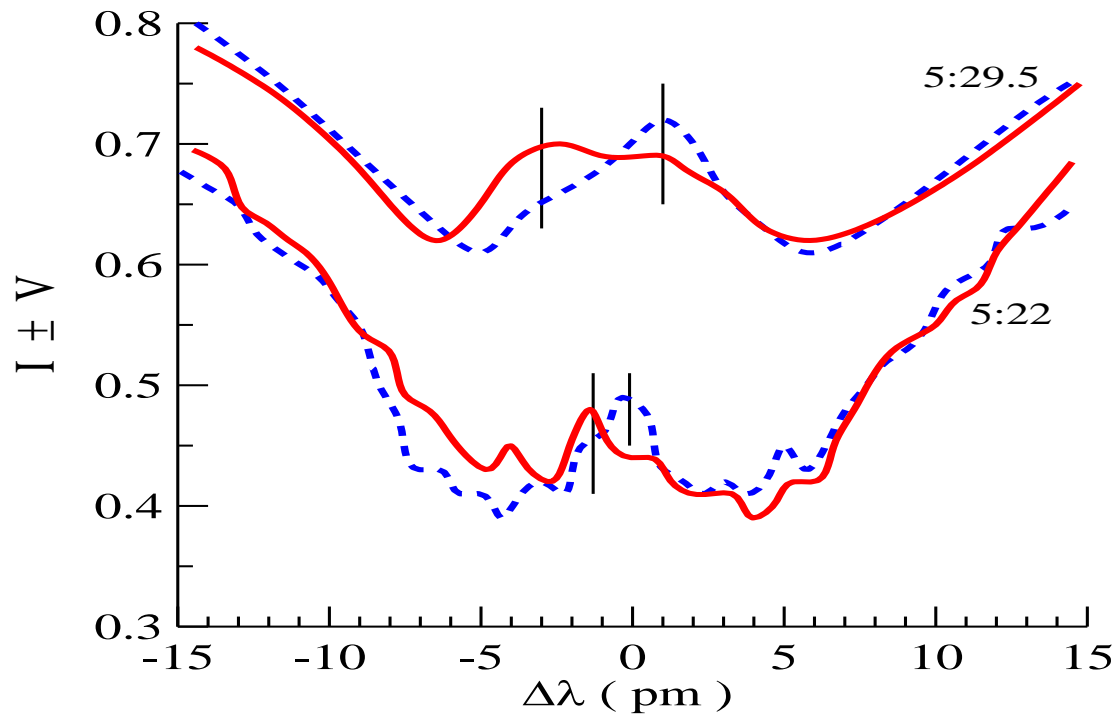
На сьогодні домінує уявлення, що найсильніші магнітні поля спостерігаються у сонячних плямах, де їх напруженість знайдена в межах 2000-8000 Гс. Такі магнітні поля виявлені при факторі заповнення f , близькому до одиниці ($f \approx 1$).

Однак не виключено, що у дуже дрібних (просторово нероздільних) структурах, для яких $f \ll 1$, можуть бути значно сильніші магнітні поля. Прямі вимірювання таких сильних магнітних полів можливі лише по ефекту Зеємана. Оскільки у цьому випадку величина спектрального розщеплення $\Delta\lambda_H$ ліній $\Delta\lambda_H \sim gB$, g – фактор Ланде, B – напруженість магнітного поля, то особливо сильні поля мають давати такі спектральні прояви:

- (1) дуже слабкі і відповідним чином поляризовані особливості дуже далеко (кілька ангстрем) від центрів ліній з великими факторами Ланде ($g = 2-3$);
- (2) достовірні прояви ефекту Зеємана у профілях ліній з дуже малими факторами Ланде (≈ 0.01).

У 1990-х роках були виявлені прямі свідчення існування екстремально сильних магнітних полів на основі застосування методів класичної зєсман-спектрополяриметрії. Спектри в ортогональних циркулярних поляризаціях I+V та I-V фотометрувались окремо, і для їх «прив'язки» по довжинах хвиль використовувались телуричні або немагнітотчутливі лінії, у яких теоретичний фактор Ланде g_{LS} рівний нулю. І от виявилось, що по телуричних лініях така «прив'язка» здійснюється без проблем, а от по лініях $g_{LS} = 0$ виникають проблеми у випадку сильних емісійних піків в лініях FeI, які спостерігаються у потужних сонячних спалахах балу X: ці емісійні піки іноді мають розщеплення. Це розщеплення, якщо виразити його у напруженостях магнітного поля з врахуванням емпіричних факторів Ланде ($g_{emp} \approx 0.01$), відповідає 10^4 - 10^5 Гс.





Спостережені профілі $I \pm V$ лінії Fe I 5434.5 ($g_{\text{emp}} = -0.014$) у сонячному спалаху 16 червня 1989 р. Розщеплення емісійних піків в центрі лінії ймовірно вказує на “надсильні” магнітні поля, $B \approx 30\text{-}100$ кГс (Лозицький, КФНТ, 1993, 1998). Дуже вузькі емісійні піки (з шириною до 30 мÅ) вказують на те, що надсильні магнітні поля створюють надсильне охолодження плазми – кінетична температура при цьому падає до значень нижче 1000 К.

За останні 50 років цей ефект спостерігався на ГСТ АО КНУ у 5 сонячних спалахах балу X.

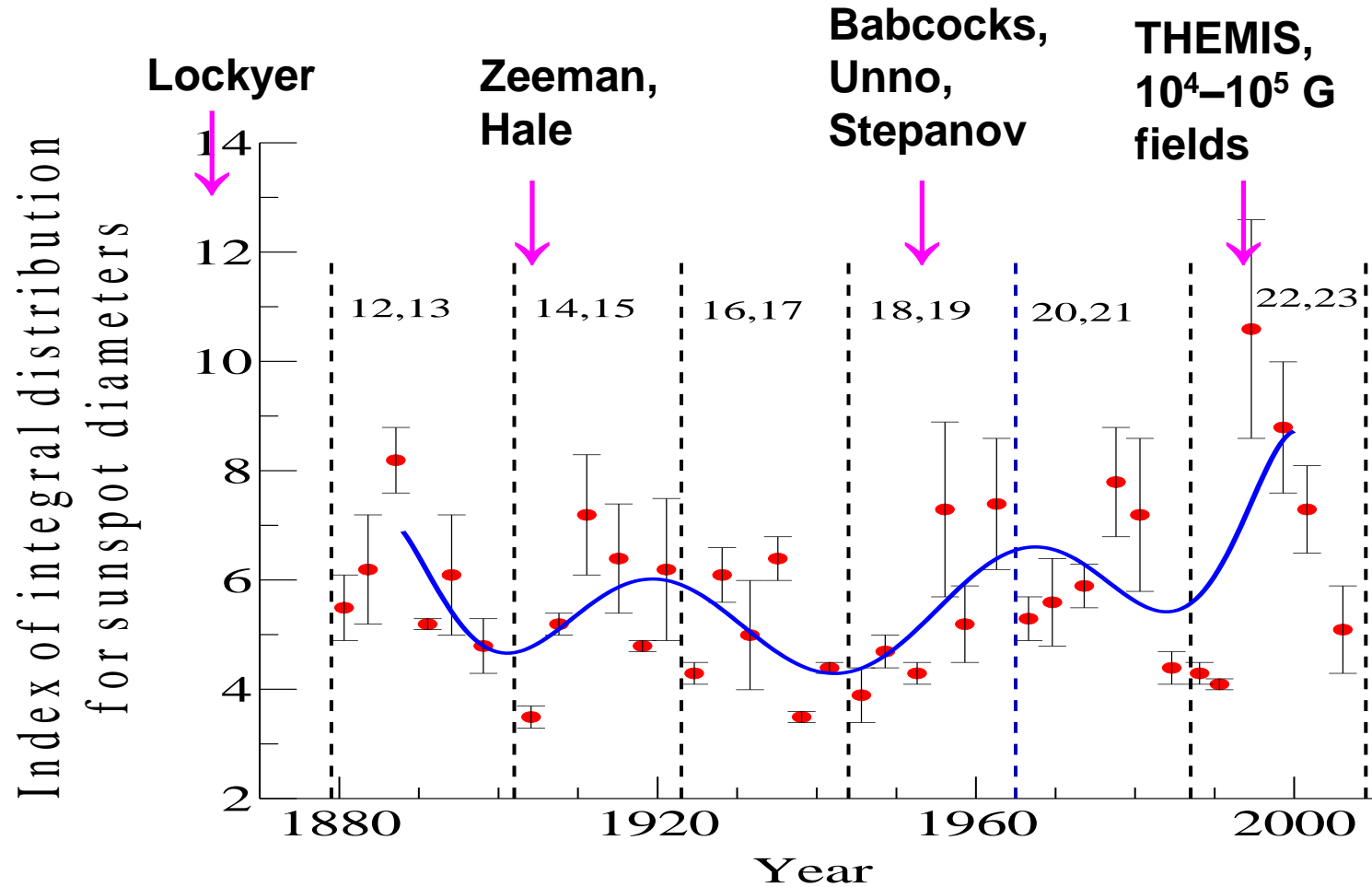
Цікаво, що виявлення таких полів у 1990-х роках цілком узгоджується з тенденцією, підміченою Harvey (1986)...

BRIEF CHRONOLOGY OF SOLAR MAGNETIC FIELD INVESTIGATIONS by Harvey (1986)

Year	Solar cycle	Content	Author
1866	10	Visual spectroscopy of split lines in sunspots	Lockyer et al.
1896	13	Zeeman effect discovered	Zeeman
1908	14	Zeeman effect observed in sunspots	Hale
1952	18	Photoelectric mapping magnetograph	Babcocks
1956	19	Theory of line transfer in a magnetic field	Unno, Stepanov
1990s	22	High-resolution telescopes (THEMIS, SOT. etc.) ?	Many authors

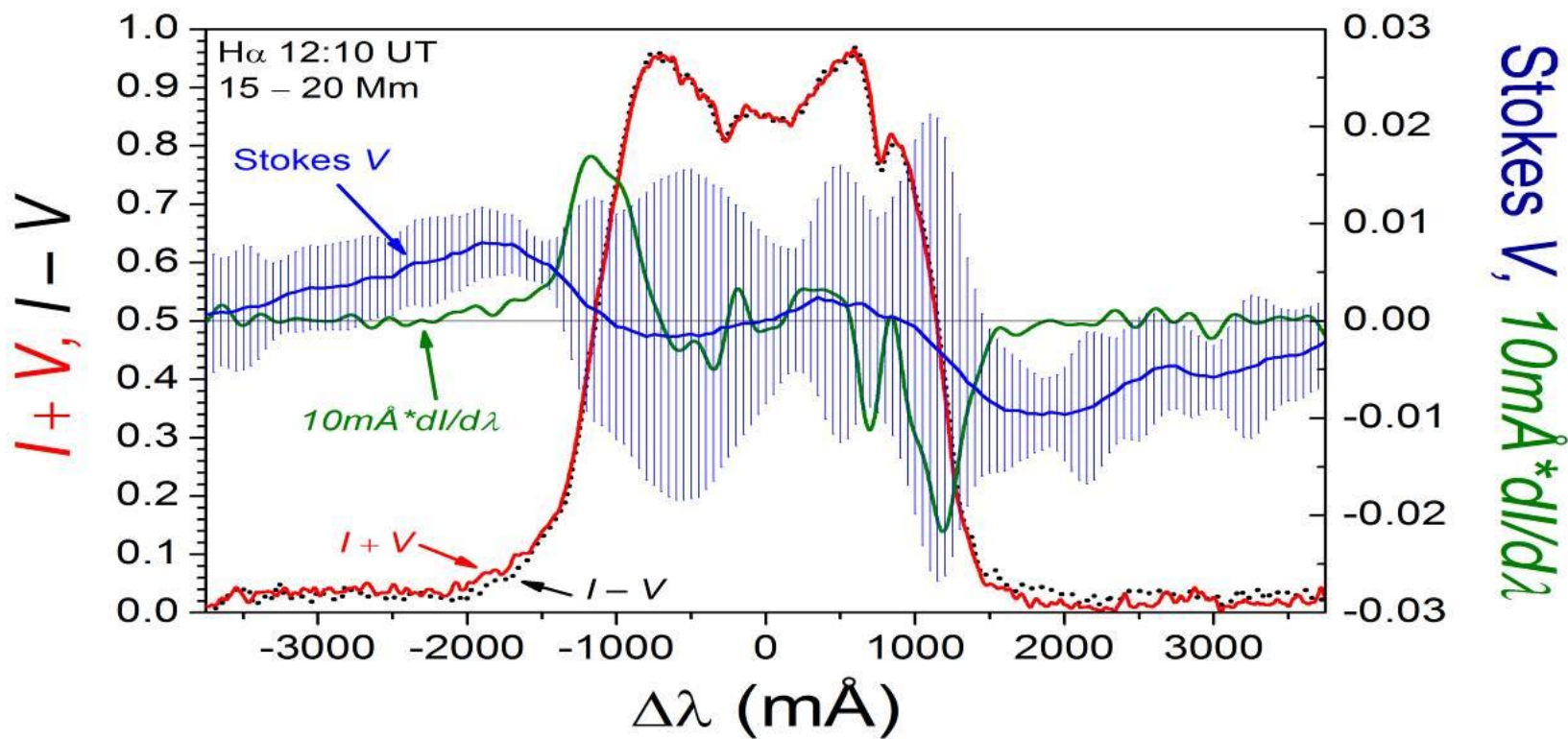
Harvey (1986): “There is a **major advance** in this subject **every four sunspot cycles**. If this trend continues, it will be time for another major advance **in the 1990’s**”.

Double Hale's cycle (≈ 44 years) on the Sun and on Earth



Efimenko & Lozitsky, 2018, Adv. in Space Res., Vol.61 (Q2)

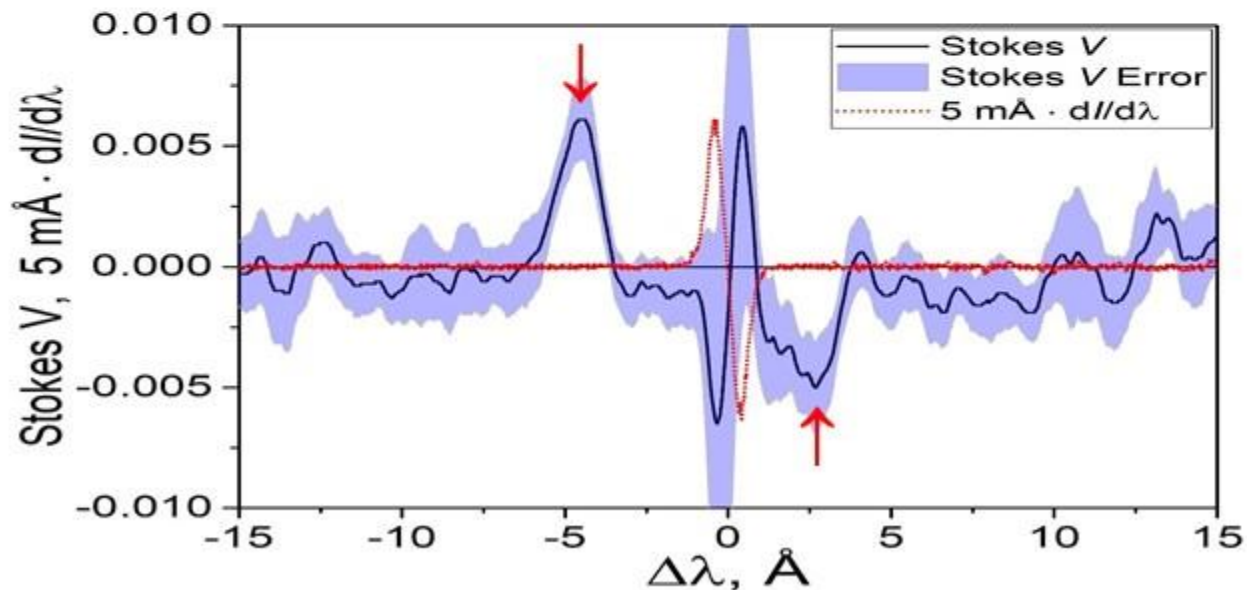
**Спектральні ознаки магнітних полів $B \approx 90$ кГс
у лімбовому сонячному спалаху, виявлені на віддалі
 $\approx 2 \text{ \AA}$ від центру лінії H-альфа**



Comparison of the observed $I \pm V$, V , and $dI/d\lambda$ profiles for the H α line in the solar flare of July 14, 2005, at an averaging interval of 15-20 Mm (Yakovkin I.I., Lozitsky V.G. Signatures of superstrong magnetic fields in a limb solar flare from observations of the H α line // Advances in Space Research, 2022, vol 69, iss 12) - 8 посилань і 7 рекомендацій у Research Gate.

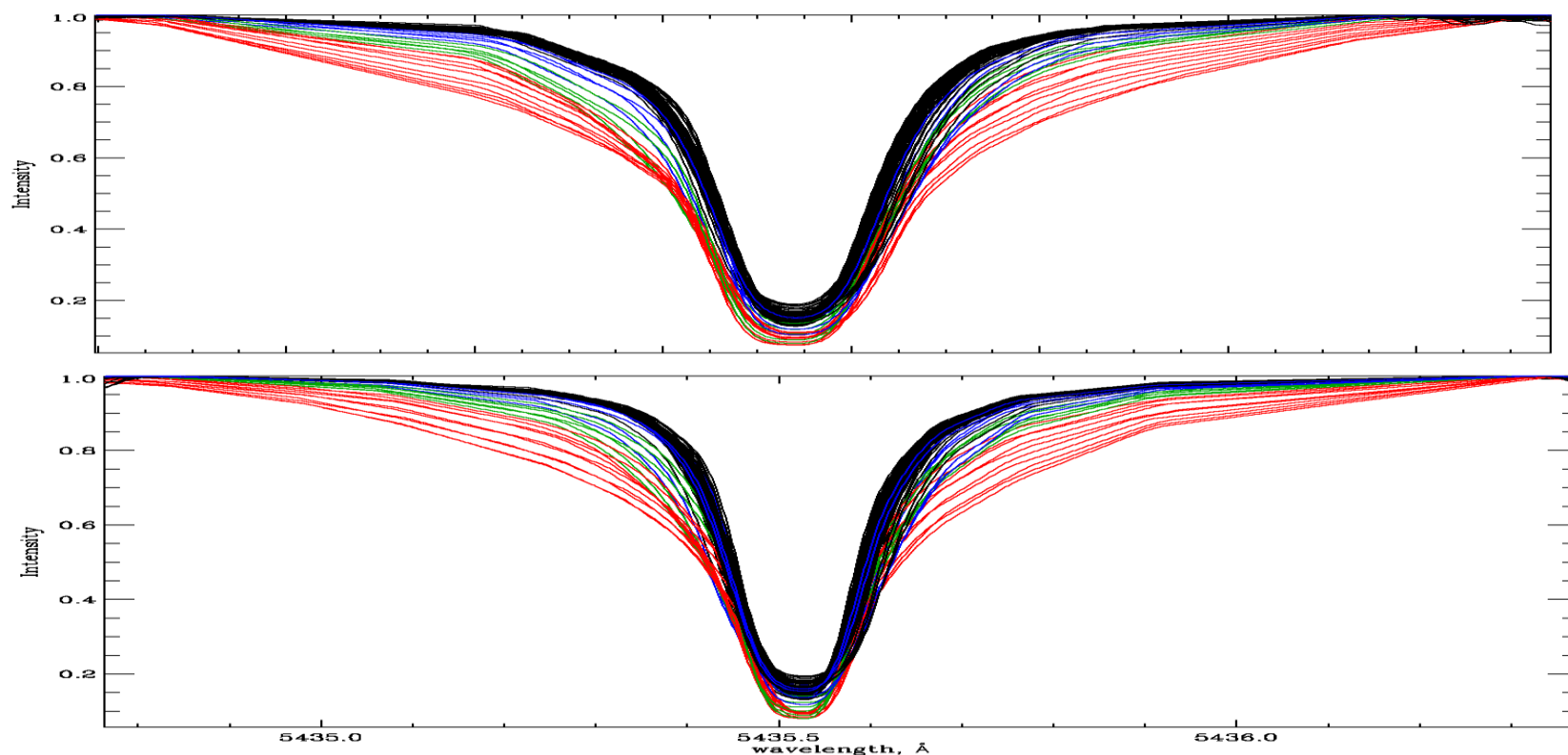
За даними спостережень на ГСТ АО КНУ виявлено достовірну циркулярну поляризацію протилежного знаку в далеких крилах лінії D3 HeI (на віддальх 2.7- 4.5 Å від її центру) у двох потужних сонячних спалахах балу X, яка, найімовірніше, вказує на магнітні поля діапазону 10^5 Гс. Для обґрунтування цієї інтерпретації досліджено теоретичні особливості ефекту Пашена-Бака в магнітних полях до 100 кГс. Виявилось, що при таких полях спектральна ширина компонентів розщеплення лінії D3 відносно невелика, 0,3 Å, тоді як ширина спостережуваних піків іноді значно більша, що може вказувати на значну дисперсію напруженостей у спалахах. На основі модельних розрахунків показано, що в деяких випадках можливе альтернативне пояснення даних спостережень, яке включає значно слабші магнітні поля (5,5-7,1 кГс), але значні макроскопічні швидкості різних знаків, на рівні 50 -60 км с⁻¹.

(Yakovkin I.I., Lozitsky V.G., 2023, MNRAS, Vol. 523, Iss. 4, pp. 5812–5822)



Пошуки особливо сильних магнітних полів у ГАО НАНУ, на телескопі АЦУ-5 ім. Ернеста Гуртовенка

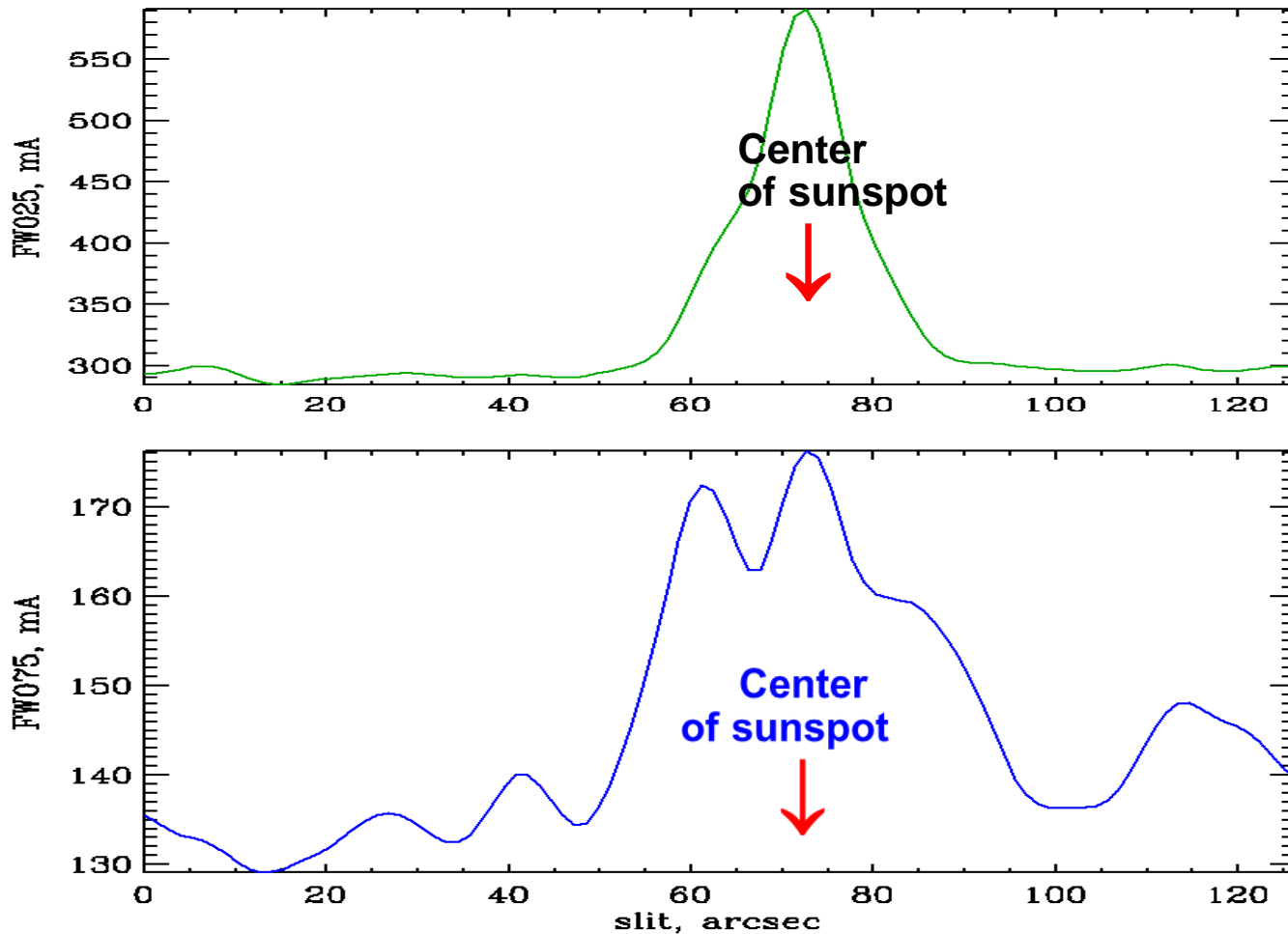
Детально досліджувались у сонячних плямах профілі ліній 15-го мультиплету, **FeI, 5397.14 and 5434.52**, які мають дуже близьку температурну чутливість і висоту формування в атмосфері Сонця, але дуже різні фактори Ланде, **1.426 і -0.014**, відповідно.



Зміни параметрів FW025 і FW075 профіля Стокса I в лінії Fe I 5397.1 в області сонячної плями

5 вересня 2021 р.

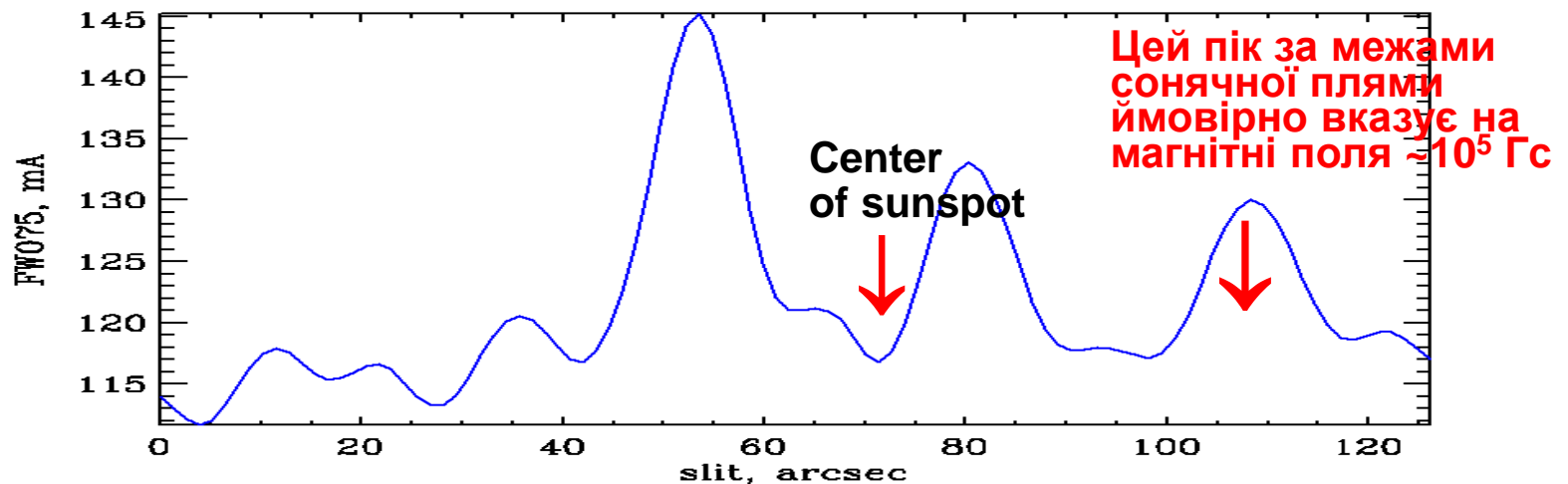
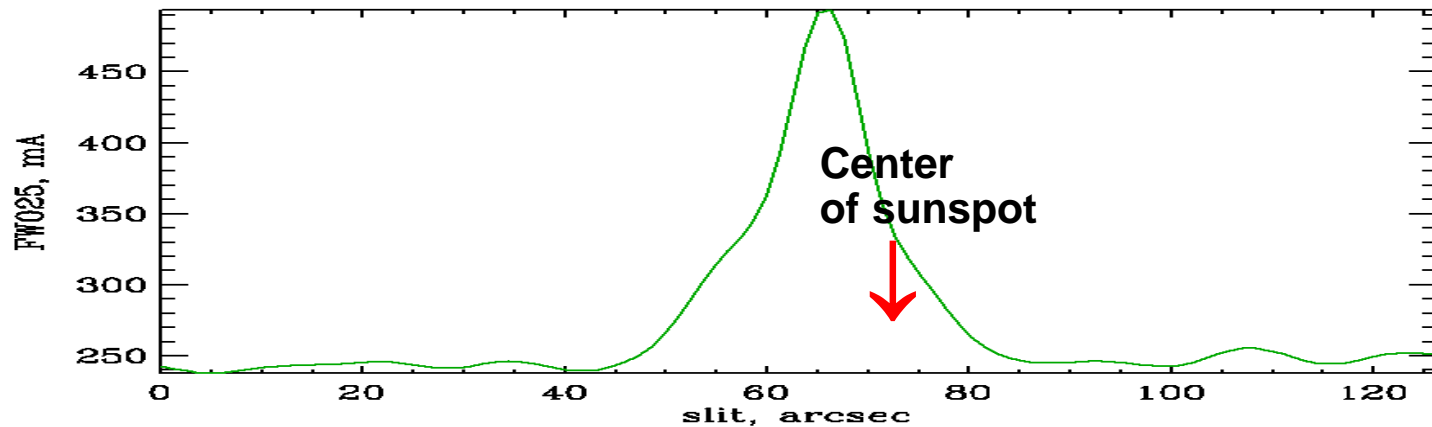
(Lozitsky V.G., Osipov S.M., Stodilka M.I. Journal of Physical Studies, 2022, Vol. 26, No. 4)



Зміни параметрів FW025 і FW075 профіля Стокса / в лінії Fe I 5434.5 в області сонячної плями

5 вересня 2021 р.

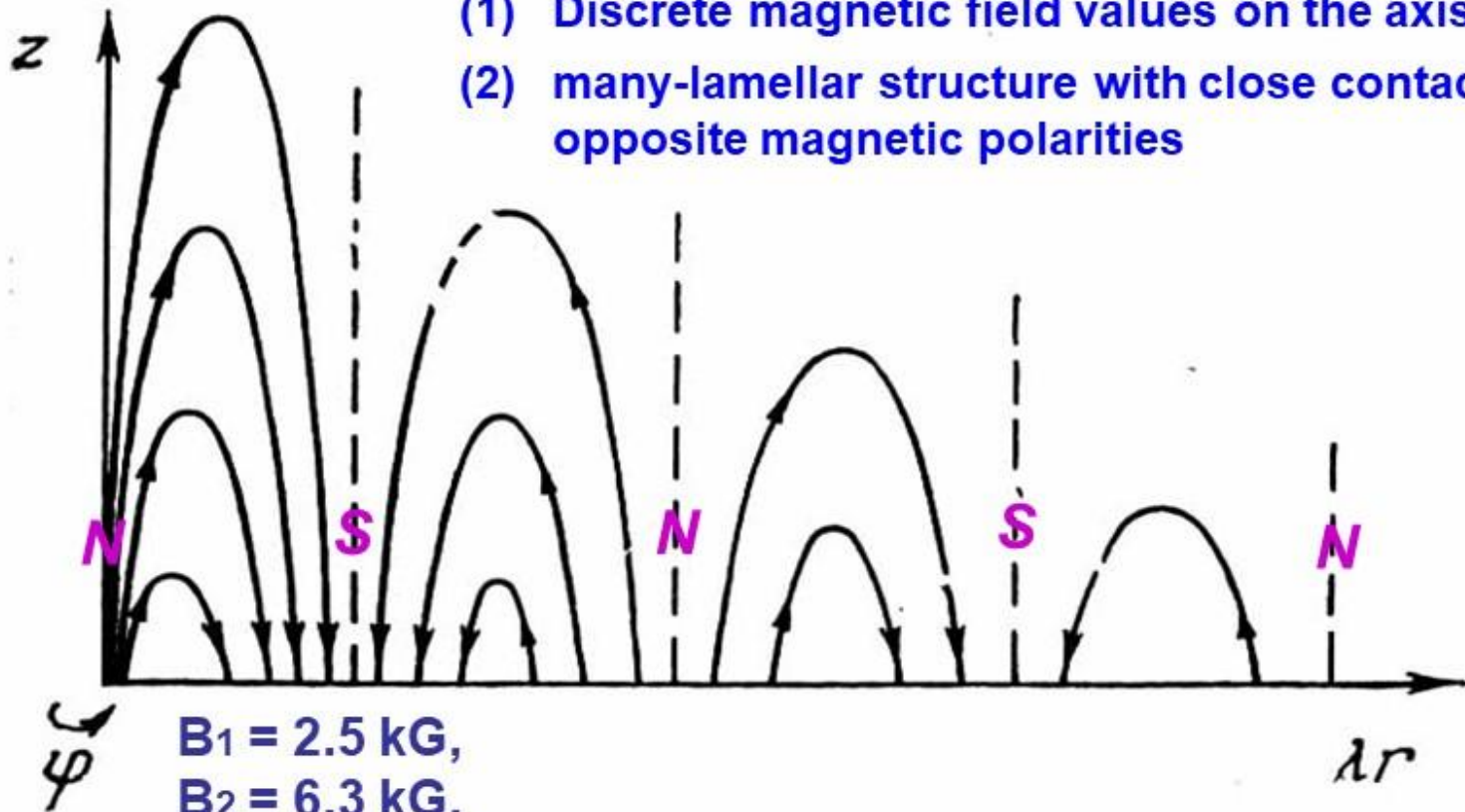
(Lozitsky V.G., Osipov S.M., Stodilka M.I. Journal of Physical Studies, 2022, Vol. 26, No. 4)



Transversal magnetic field distribution in linear force-free model by Solov'ev & Lozitsky (1986)

Two exotic peculiarities:

- (1) Discrete magnetic field values on the axis
- (2) many-lamellar structure with close contact of opposite magnetic polarities



As to theory, interesting point of view was presented by Stenflo (2000). It based on so-called “similarity transformations” (Alfven and Fälthammar, 1963).



Hannes Alfven and Jan Stenflo (1960s)

Оцінки Я.О. Стенфло на основі “перетворень подібності” (“similarity transformation”)

**Stenflo, J.O., Journal of Astrophys. Astron. (India). 2000.
Vol. 21. P. 451**

Основні ідеї: Сонячна плазма (від ядра, сонячної корони і спалахів) на діаграмі “температура-густина” займає приблизно те ж розташування, що і лазерна плазма, плазма в токамаках і вибухова плазма. Однак сонячна і лабораторна плазма мають фундаментальну відмінність – вони займають суттєво різні об’єми.

Приведення одного масштабу до іншого не може бути зроблено довільно, без зміни інших фізичних параметрів. Один з формалізованих підходів, який дозволяє грубо оцінити порядок величин при такому приведенні, – т. зв. **“перетворення подібності” (Alfven H., Fälthammar C.-G., Cosmical Electrodynamics – Fundamental Principles. 2nd edition. Oxford Univ. Press. 1963)**

Припустимо, що лінійний масштаб змінився на фактор γ . З рівнянь Максвелла випливає, що часовий масштаб повинен тоді змінитись також на фактор γ , електричне поле E і магнітне поле B – на фактор γ^{-1} , густина електричного струму – на γ^{-2} і т. д.

Тобто, можна очікувати: **у скільки разів зменшиться розмір структури, у стільки ж разів там може бути сильніше магнітне поле.**

Перевірити справедливість цього підходу можна на якомусь конкретному прикладі...

Стенфло (2000) відмічає, що якщо взяти для прикладу сонячний магнітний цикл, для якого $l \approx 10^6$ км, $B \approx 10$ Гс, $t \approx 22$ роки і порівняти його з лабораторним масштабом $l \approx 1$ м, то маємо фактор $\gamma \approx 10^{-9}$. Тоді відповідні лабораторні значення $B_{\text{lab}} \approx 10^{10}$ Гс, $t_{\text{lab}} \approx 1$ сек.

Але де в Природі існують магнітні поля $\approx 10^{10}$ Гс ?
Такі і навіть значно сильніші – на нейтронних зорях. Але там гігантський магнітний тиск $B^2/8\pi$ може бути зрівноважений відповідним газовим тиском. Цього немає у сонячних спалахах, де магнітний тиск на 3-5 порядків перевищує газовий тиск. Тобто тут умова рівноваги відповідної магнітної структури не виконується і тому вона взагалі не повинна існувати.

Можливо, тут грають певну роль деякі специфічні топологічні особливості силових ліній у таких структурах на Сонці, напр., сильна скрученість або згин силових ліній. В останньому випадку, області особливо сильного поля мають бути оточені областями слабшого поля протилежної полярності. Цікаво, що за даними з ГСТ і АЦУ-5, у деяких місцях сонячних плям ми дійсно спостерігаємо такий тісний контакт сильних і особливо сильних полів протилежної полярності.

Необхідні нові спостереження і теоретичні дослідження...

Перспективи

Що стосується спостережень, то необхідні нові спектро-поляриметричні спостереження активних процесів на Сонці не тільки з більш високим відношенням сигнал/шум (10^3 або краще), але й у широкому спектральному діапазоні (≥ 5 ангстрем) навколо вибраних магніточутливих ліній.

На жаль, більшість сучасних великих сонячних телескопів мають у якості спектральних монохроматорів не класичні спектрографи на основі дифракційної ґратки з дуже широкою областю дисперсії (сотні й тисячі ангстрем), а фільтри Фабрі-Перо. Вони дуже компактні і можуть мати високу спектральну роздільну здатність ($\sim 10^5$), але при дуже вузькій області дисперсії. Наприклад, на 1.6-метровому телескопі обсерваторії Big Bear існуючий там фільтр дозволяє вимірювати магнітні поля лише до 9 кГс (інформація від проф. Юрчишина В.Б). Найбільший у світі 4-м сонячний телескоп також працює на фільтрах Фабрі-Перо.

Тому подальше використання традиційних спектрографів з дифракційними ґратками, які, зокрема, використовуються в АО КНУ і ГАО НАНУ, не є безнадійним відставанням у даному напрямі. Навпаки, саме з такими інструментами можна шукати й знаходити екстремально великі напруженості і променеві швидкості. Це може дати нову важливу інформацію, яка, як це не парадоксально, не може бути підтверджена на великих телескопах. Також на орбітальних обсерваторіях SOHO і SDO в принципі не можна підтвердити феномен надсильних магнітних полів.



Дякую !